

我が国の中長期的な開発戦略について



令和4年11月
科学技術・イノベーション推進事務局



核融合技術の開発戦略

国内外の動向を踏まえた長期戦略
これまでの課題を踏まえどう取り組むか等

国内外の動向を踏まえた長期戦略等について①

《論点》

- ・ITERの進捗や、諸外国政府・核融合ベンチャー等の動向を踏まえた上で、核融合発電実証に向けて我が国は中長期的にどのように取り組むべきか。
- ・核融合発電の実証時期について、核融合科学技術委員会における前倒しの技術的検討に加え、産業界における予見性の向上、環境エネルギー政策、経済安全保障上の観点なども加味し、国家戦略としてどのように位置づけるべきか。
- ・ITER計画の経験・技術蓄積の優位性を最大限活用しつつ、原型炉を我が国で実現するために取り組むべき課題は何か。
- ・ITER計画で解決できない技術開発課題にどのように取り組むのか（例：BA活動）

《第1回有識者会議にて委員よりいただいた意見》

- ・核融合発電にフォーカスすると、安定的なクリーンエネルギー、経済安全保障上重要な国産エネルギー、国際貢献といった、核融合発電のエネルギー開発としての位置付けを明確にし、社会実装をどう戦略的に進めるかということを、今回の核融合戦略の中で描いていきたい。（栗原委員）
- ・基礎研究を幅広くやるということも重要。その一方で応用段階では、他の戦略との整合性を持ちながら、日本が勝てる分野により具体的に戦略を描いて、重点的に取り組んでいくとすることが必要。（栗原委員）
- ・核融合発電としての社会実装に向けて、長期及び巨大なエネルギー開発プロジェクトであり、コミットするためにはより明確な意思表明と合意形成が必要。発電プロジェクトとして明確なビジョンが必要。そのためには、将来のエネルギービジョンの中で、この核融合発電がどう位置付けられていくのか。それから、優位性とか競争力というところがあるのかなのかという中で、どういう位置付けで取り組んでいく、誰が取り組んでいくべきなのかということで、描く必要がある。（栗原委員）
- ・（原型炉について）時期を前倒しするためには、単に2050年であれば実現できるものを5年早まる、10年早まるということではなく、早まる代わりにスペックが何らか変わり、そのスペックで時期を早めることが有効なのかどうかということを考える必要がある。（栗原委員）
- ・核融合発電の実証時期を明確にして、技術開発の戦略、体制を議論することが大事。（池田委員）
- ・発電システムと産業サプライチェーンというものを明確に描いていく必要がある。炉だけではなく、どういう発電システムになっていくのか、機器はどうなのか、燃料、トリチウムの調達、あるいは生成はどうなのか、バックエンドについてはどう考えるのか、立地、既存の発電システム、系統等との関係性、それからベンチャー企業の裾野の拡大、そういう中で開発体制とか実施組織の在り方についての基本的な考え方ということを議論する必要がある。（栗原委員）

国内外の動向を踏まえた長期戦略等について②

《論点》

- ・ITERの進捗や、諸外国政府・核融合ベンチャー等の動向を踏まえた上で、核融合発電実証に向けて我が国は中長期的にどのように取り組むべきか。
- ・核融合発電の実証時期について、核融合科学技術委員会における前倒しの技術的検討に加え、産業界における予見性の向上、環境エネルギー政策、経済安全保障上の観点なども加味し、国家戦略としてどのように位置づけるべきか。
- ・ITER計画の経験・技術蓄積の優位性を最大限活用しつつ、原型炉を我が国で実現するために取り組むべき課題は何か。
- ・ITER計画で解決できない技術開発課題にどのように取り組むのか（例：BA活動）

《第1回有識者会議にて委員よりいただいた意見》

- ・核融合によって将来どのような社会になるのか、日本における核融合の活用の仕方が重要。日本の核融合戦略が社会的価値を生み出していけるよう、目指す活用の姿という土台を創ることを提案。活用の姿を実現していくための必要な機能や、サプライチェーン、その担い手を明らかにしていくことが必要。（近藤委員）
- ・長年日本が注力してきたITERを含めた核融合の研究には、進展の成果もあり、その過程でうまくいかなかったこと、挑戦や克服と課題がある。これらについては将来財産になると思い、次の将来の核融合に関わる方の重要な手掛かりとして振り返ることが重要。核融合戦略を始める起点の設定として重要。（近藤委員）
- ・事業領域の考え方。開発サイクルが長い炉本体の開発と、開発サイクルが短い周辺機器の開発は、どちらかに考え方を寄せるということではなく、その特徴を踏まえ、戦略立案する必要がある。（近藤委員）



《検討の方向性》

総論として、

- ・核融合発電の実証時期を明確にした上で、技術開発の戦略、体制を議論すること

実証時期について、

- ・原型炉の前倒しによる有用性、コストや実施体制の検討（例：技術課題を段階的に解決）

研究開発戦略と体制について、

- ・原型炉の炉に加えて発電システム（機器、燃料調達）も含めた全体を俯瞰した上で戦略を描くこと
- ・サプライチェーンとその担い手を整理
- ・ITER計画で培った経験、課題はなにか（例：大型プロジェクトであるが故の困難さ）
- ・機器ごとの開発サイクルを踏まえた戦略立案（例：原型炉開発とベンチャーによる機器、炉開発）

核融合技術の開発戦略

小型炉や新世代の核融合等の独創的な
新興技術について

我が国の小型炉等開発

- 海外の小型炉開発ベンチャーで開発している炉型と同様の実験装置にて、日本のアカデミアでも研究を実施。

海外企業名	炉型/特徴	日本での研究内容例
TAE Technologies 米国、カリフォルニア	<ul style="list-style-type: none"> 磁場反転配位(FRC)型 中性子を発生しない水素-ホウ素核融合が目標 荷電粒子による直接発電 	<ul style="list-style-type: none"> 日本大学 FRC衝突・合体実験装置FAT-CMを用いて、理論的には効率よい核融合炉心を実現する可能性があるFRCプラズマの実験を実施。TAE Technologies社とも研究協力。
General Fusion カナダ、バーナビー	<ul style="list-style-type: none"> 衝撃波磁化標的核融合(MTF) ※ピストンで音響圧力波を生成し、プラズマを繰返し生成・圧縮する方式 液体金属の熱交換で発電 	<ul style="list-style-type: none"> 東京大学 ※ 類似装置による研究 球状トラス合体実験装置を用いてスフェロマック型閉じ込め方式も含む多様なプラズマを生成し、プラズマの挙動や、磁気リコネクションなどの物理解明に向けた研究開発。 兵庫県立大学 スフェロマック型コンパクトトラス閉じ込め方式によるプラズマ発生装置 HIST/FACTを用いたプラズマ機構の解明、燃料供給法の確立等に向けた研究開発。
Tokamak Energy 英国、オックスフォードシャー	<ul style="list-style-type: none"> 球状トカマク型 小型化に必要な高温超伝導マグネットを開発中 ブランケットで発電 	<ul style="list-style-type: none"> 東京大 球状トカマク実験装置 (UTST, TST-2) を用いた高ベータプラズマ加熱・維持手法の確立、回転磁場を用いた内部電流型定常プラズマ源の実現、プラズマ不安定性の研究、計測手法等の開発。 京都大 低アスペクト比トラス装置 (LATE) を用いて、電子サイクロトロン共鳴加熱のみによるマイクロ波球状トカマクの加熱・輸送・平衡特性についての研究開発。 九州大 QUEST装置 (球状トカマク装置) を用いて、球状トカマクプラズマの長時間電流駆動およびプラズマ-壁相互作用の研究開発。 核融合科学研究所 核融合炉用マグネットの巻線に適した高温超伝導導体の研究開発。
ロッキードマーチン 米国、	<ul style="list-style-type: none"> ベータ核融合装置は磁気ミラー型の中に、磁場を逆向きにした小型の磁気ミラー型を配置した構造 	<ul style="list-style-type: none"> 筑波大学 軸対称化タンデムミラー装置 GAMMA10/PDXを用いた高温高密度プラズマ生成、計測機器や加熱装置の研究開発、ダイバータや材料の熱負荷に関する研究開発。

様々な核融合研究

- トカマク、ヘリカルといった磁場閉じ込め型の総合研究開発以外にも、多様な核融合技術開発が進展。
- 小型炉等の研究開発と同様にこれら方式の研究開発は、核融合業界の裾野を広げ、先進技術による相互イノベーションと核融合人材の育成としても重要。
- 破壊的イノベーションの創出や将来のクリーンなエネルギー源確保、サプライチェーンの脆弱性が将来の国民生活を脅かさないためにも、核融合技術群としてこれら研究開発の強化を検討すべきではないか。

		研究内容例	波及技術例
磁場閉じ込め (トカマク) (ヘリカル)		<ul style="list-style-type: none"> • 量子科学技術研究開発機構 トカマクの研究開発として、ITER国内機関としてITER機器調達を実施。BA活動の実施機関としてJT-60SAを建設。 • 核融合科学研究所、京都大学 ヘリカルの研究開発として、LHD装置やヘリオトロン装置によるプラズマ物理研究を実施。 	<ul style="list-style-type: none"> • 大型構造物製作基盤技術 • 超伝導技術 • 高電圧大電力伝送技術
慣性閉じ込め (レーザー)		<ul style="list-style-type: none"> • 大阪大学、光産業創成大学院大学 燃料ペレットをレーザーで瞬時に加熱し、超高密度・超高温のプラズマを生成、慣性力でその場にとどまる間に核融合反応を起こす研究 	<ul style="list-style-type: none"> • レーザーによる切断・加工技術(廃炉、溶接) • 核変換技術(医療用RI)
発電プラント技術		<ul style="list-style-type: none"> • 京都フュージョニアリング社 核融合炉からの熱取り出し・発電に関する一連の機器を実環境に近い条件下で統合的に開発試験 	<ul style="list-style-type: none"> • 発電システム技術
革新技術	ミュオン触媒 核融合	<ul style="list-style-type: none"> • 中部大学、東北大学、高エネルギー加速器研究機構 加速器を利用してミュオンを生成し、それを触媒として水素の同位体の原子核同士を引きつけて核融合反応を起こす研究 	<ul style="list-style-type: none"> • 加速器技術 • 核変換廃棄物処理 • 非破壊元素分析
	凝縮系 核反応	<ul style="list-style-type: none"> • 東北大学、クリーンプラネット社 パラジウム電極を用いた重水の電気分解において過剰熱を発生させる研究 	<ul style="list-style-type: none"> • 熱発生装置

検討の方向性（案）

長期戦略における下記課題の解決の方向性を見出すことが必要。

総論として、

- ・核融合発電の実証時期を明確にした上で、技術開発の戦略、体制を議論すること

実証時期について、

- ・原型炉の前倒しによる有用性、コストや実施体制の検討（例：技術課題を段階的に解決）

研究開発戦略と体制について、

- ・原型炉の炉に加えて発電システム（機器、燃料調達）も含めた全体を俯瞰した上で戦略を描くこと
- ・サプライチェーンとその担い手を整理
- ・ITER計画で培った経験、課題はなにか（例：大型プロジェクトであるが故の困難さ）
- ・機器ごとの開発サイクルを踏まえた戦略立案（例：原型炉開発とベンチャーによる機器、炉開発）

独創的な新興技術の推進方策について、

- ・日本のアカデミアでも取り組んでいる海外の小型炉開発ベンチャーの炉に対応した研究開発や多様な核融合方式は、破壊的イノベーションの創出や将来のクリーンなエネルギー源確保、サプライチェーンの脆弱性が将来の国民生活を脅かさないためにも、核融合技術群としてこれら研究開発の強化を検討すべきではないか。

参考資料

海外の核融合ベンチャーの動向

- 近年、イーター計画の進捗による技術的成熟に対する信頼感の形成、カーボンニュートラルに対する政策的要請の高まりを背景としつつ、主要国において、核融合ベンチャーの設立、民間投資の獲得が相次いでいる。
- 各国政府が推進する核融合炉計画にも参画しているが、ナショナル・プロジェクトで十分に取組を始めていない未実証の新技术に着目し、集中的な技術実証を進めている。

企業名	資金源	研究内容		パイロットプラントの計画
TAE Technologies 米国、カリフォルニア 	<ul style="list-style-type: none"> 投資による資金調達 累積1000M米ドル (約1380億円) 	<ul style="list-style-type: none"> 磁場反転配位(FRC)型(国内では日本大学) 本方式の原理実証を通じて、中性子を発生しない水素-ホウ素核融合が目標 荷電粒子による直接発電 		<ul style="list-style-type: none"> 2030年代に30~50万キロワット
Commonwealth Fusion Systems 米国、マサチューセツ 	<ul style="list-style-type: none"> マサチューセツ工科大学 投資による資金調達 累積2000M米ドル (約2720億円) 	<ul style="list-style-type: none"> トカマク型(国内ではQST) 小型化に必要な高温超伝導磁石を開発中 ブランケットで発電 		<ul style="list-style-type: none"> 2030年代早期に20万キロワット
General Fusion カナダ、バーナビー 	<ul style="list-style-type: none"> カナダ政府 投資による資金調達 累積300M米ドル (約414億円) 	<ul style="list-style-type: none"> 衝撃波磁化標的核融合(MTF) ※ピストンで音響圧力波を生成し、プラズマを繰返し生成・圧縮する方式 液体金属の熱交換で発電 		<ul style="list-style-type: none"> 2030年代早期に23万キロワット
Tokamak Energy 英国、オックスフォードシャー 	<ul style="list-style-type: none"> 英国政府 投資による資金調達 累積250M米ドル (約345億円) 	<ul style="list-style-type: none"> 球状トカマク型(国内では東京大、京都大、九州大) 小型化に必要な高温超伝導磁石を開発中 ブランケットで発電 		<ul style="list-style-type: none"> 2030年代早期に50万キロワット
First Light Fusion 英国、オックスフォードシャー 	<ul style="list-style-type: none"> オックスフォード大学 投資による資金調達 累積97M米ドル (約134億円) 	<ul style="list-style-type: none"> 衝撃波慣性核融合 ※レーザで発射した銅板を燃料ペレットに衝突させ、その衝撃波でプラズマを生成する方式 液体金属の熱交換で発電 		<ul style="list-style-type: none"> 時期は不明だが15万キロワット

国内の核融合ベンチャーの動向

- 我が国においても核融合に関連したベンチャーが近年立ち上がっている。
- 文部科学省が推進している原型炉合設計同特別チームにも、国内の核融合ベンチャーあるいはベンチャーを起業した研究者が参画しており、国内企業及び大学・国立研究所と連携して、原型炉設計活動にも貢献(130名中5名)。

企業名	資金源	研究内容		備考
 浜松ホトニクス 日本、浜松市	・ 自社資金 年間10億円	・ 高強度レーザーによる慣性核融合の実証を目指し、高強度レーザーを開発 ・ 産業への技術応用も展開		・ 2015年、浜松ホトニクス産業開発研究所に実験施設を建設 ・ 研究員30名程度 ・ 大阪大、光産業創成大学院大学、トヨタ自動車と連携
 京都 フュージョニアリング 日本、京都市	・ 京都大学 ・ 投資による資金調達 累計16.7億円	・ 核融合に関する技術開発とエネルギー平和利用を目的としたエンジニアリング企業 ・ 欧米の大学関連企業や核融合炉プロジェクトに対してブランケット、ダイバータなどの主要機器やプラント設計を供給することが目標		・ 2019年、京都大学エネルギー理工学研究所の教授を中心に設立 ・ 核融合エネルギーの変換と利用、燃料となる三重水素のハンドリング、中性子源の利用、熱工学を専門 ・ 経済産業省令和2-3年度「原子力産業基盤強化事業補助金」の間接補助対象事業者に採択
 Helical Fusion 日本、東京都	・ 核融合科学研究所 ・ 投資による資金調達 累計 6千万	・ ヘリカル（ヘリオトロン）磁気配置の核融合炉の実現が目標		・ 2021年に核融合科学研究所の研究者らによって設立 ・ 2040年前半にパイロットプラント（商用炉、発電量は100MW）を想定
 EX-Fusion 日本、大阪府	・ 大阪大学 ・ 投資による資金調達 累計 1.3億円	・ 慣性レーザー核融合方式による発電の商用化が目標		・ 2021年にレーザー核融合を研究してきた大阪大学レーザー科学研究所や光産業創成大学院大学の研究者らによって設立 ・ 2030年代後半にパイロットプラントを想定



諸外国における発電実証時期シナリオ

- 我が国では、ITER計画における2035年の核融合運転開始の結果を踏まえて、発電実証を行う原型炉への移行判断を行い、21世紀中葉での発電実証を目指すこととしてきた
- **海外の政府戦略でも、ITER計画との連動がみられる一方、民間企業との連携による開発の加速化（米、英）や、政府主導での早期開発の動き。また、民間企業では、さらに早期の発電実証も掲げられている。**
→発電実証時期の前倒しについて、文科省核融合科学技術委員会で技術的検討を開始
(年内にTFの議論をとりまとめ予定)

原型炉研究開発ロードマップ°（文科省核融合科学技術委員会）

